



空中加油 动力学与控制

Kongzhong Jiayou Donglixue yu Kongzhi

王海涛 董新民 等 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书由国家自然科学基金青年项目(61473307,61304120)和
空军工程大学优秀博士论文扶持基金(KGD081114006)共同资助出版

空中加油动力学与控制

王海涛 董新民 等 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书总结了作者及所在科研团队十多年来在空中加油动力学与控制研究领域所取得的部分成果,较为全面系统地介绍了空中加油技术的作战使用、历史发展和工程实践等基本知识;加油机尾涡流场、受油机头波效应的 Hallock - Burnhan 理论模拟和 CFD 数值模拟方法;变质量飞行器、软管锥套组合体和加油硬管的动力学建模仿真方法;人工电传控制增稳模态控制律设计与空中加油模态改进方法;针对高阶多输入、多输出仿射非线性系统的在线自组织近似指令滤波反推非线性控制理论及其在受油机对接飞行航迹控制中的应用。此外,各部分内容均安排翔实的仿真应用,便于读者理解掌握。

本书以空中加油动力学与控制最新理论为主线,同时包含流体力学、系统动力学建模、飞行控制、非线性控制等相关前沿方法,能够帮助空中加油爱好者尽快入门,适合从事飞行控制、非线性控制、动力学建模等研究领域的研究生、科研人员仔细研读,对于空中加油工程技术发展也具有一定指导作用。

图书在版编目(CIP)数据

空中加油动力学与控制/王海涛,董新民编著. —北京:国防工业出版社, 2016.4

ISBN 978 - 7 - 118 - 10696 - 1

I. ①空… II. ①王… ②董… III. ①空中加油 - 飞行力学 ②空中加油 - 飞行控制 IV. ①V228.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 053670 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 24½ 字数 550 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

本书总结了作者及所在科研团队十多年来在空中加油动力学与控制研究领域所取得的部分成果,目的是推广空中加油动力学与控制的基本知识与前沿理论,吸引和帮助更多研究生、科研人员深入开展空中加油相关研究,促进国内空中加油理论和工程的研究应用。

从个性特点看,空中加油应该是最为特别的一种飞行任务。它是唯一允许空中“碰撞”的飞行,是机体外部唯一配备柔性软体设备的技术,还是相对位置实时变换的超密集编队飞行。这些特别之处需要专门的前沿理论和方法作为支撑,也正是空中加油最吸引人的地方。从共性特点看,空中加油通常是对常规飞机的局部改造,其个性理论和方法仍然要以常规飞行中的控制、气动、结构等共性理论和方法作为强有力支撑。

空中加油已经成为现代战略空军必须具备的一项基本能力。与美国、英国、俄罗斯等空中加油强国相比,我国空中加油技术能力还有较大差距,目前仅仅是解决了有无问题,远远谈不上发挥战略作用。特别是世界新型空中加油机和无人自主空中加油技术的快速发展,这种差距正在逐步拉大。

因此,开展空中加油动力学与控制的研究,不但能够突出个性理论与技术的创新、夯实共性航空科学基础、满足学术研究需要,更有助于提升战略空军作用、解决工程难点、实现技术追赶。

作者及所在科研团队希望通过本书,将十多年的研究成果与国内从事空中加油理论研究和工程开发的圈内人士共同分享。同时抛出自己的“砖”,引来更多的“玉”,吸引更多的圈外人士关注、支持、从事空中加油研究,最终将我国空中加油理论研究和工程技术做大做强。

本书共分为5篇16章,分别为:第一篇(一~四章),简要介绍了空中加油技术的作战使用、历史发展、工程实践和常见事故等基本知识,使圈外人士对空中加油建立初步感性认识、理论研究人员建立实际系统概念避免脱离实际;第二篇(五~七章),细致介绍了加油机尾涡流场、受油机头波效应的 Hallock - Burnham 数学建模和 CFD 数值模拟方法,为研究空中加油流场环境特性及其对受油机影响提供手段;第三篇(八~十章),深入介绍了时变质量飞行器、软管锥套组合体和加油硬管的动力学建模仿真方法,为分析燃油传输阶段受油机、软硬式加油设备等动力学特性,开展控制器设计提供模型支持;第四篇(十一~十四章),介绍了受油机人工电传控制增稳模态控制律设计与空中加油模态改进方法,为受油机人工空中加油模态控制律设计提供参考;第五篇(十五~十六章),介绍了作者提出的针对高阶多输入、多输出仿射非线性系统的在线自组织近似指令滤波反推非线性控制理论及其在受油机对接飞行航迹控制中的应用。控制方法突出理论创新,控制

过程对实际无人机自主空中加油工程技术具有一定借鉴意义。此外,各部分内容均安排翔实的仿真应用,便于读者理解掌握。

以上章节由6位作者集体讨论分工撰写。第二章由徐跃鉴主笔,第三章由郭军主笔,第六、十章由陈博主笔,第七章由刘娇龙主笔。其余章节由王海涛、董新民共同编写完成。感谢王健、高宇、苟义勇对本书所做的大量校稿工作。由于作者水平和资料有限,本书难免存在内容体系不够全面完整、论述不够精练专业,甚至存在错误,欢迎专家、读者不吝赐教。

编著者
2015年9月

目 录

第一篇 空中加油简介

第一章 空中加油技术的意义与发展	1
1.1 战略意义	1
1.1.1 遗憾错过第二次世界大战	1
1.1.2 现代空战显神威	3
1.1.3 空中加油技术的作用	7
1.2 起源与发展	8
1.2.1 “不可思议”的登场	9
1.2.2 英、美合作发展历程	11
1.2.3 苏联另辟蹊径	17
1.2.4 我国发展之路	25
1.2.5 不可思议的加油瞬间	26
第二章 空中加油技术分类	31
2.1 空中加油基本形式	31
2.1.1 软管锥套式(简称软式)	31
2.1.2 伸缩套管式(简称硬式)	32
2.1.3 混合式	33
2.2 伙伴式空中加油	33
2.3 直升机空中加油	34
2.3.1 作用与发展情况	34
2.3.2 难点和结构差异	36
2.3.3 加油设备简介	37
2.3.4 加油基本过程	38
2.4 无人机自主空中加油	39
2.4.1 NASA 软式自主空中加油	40
2.4.2 美国空军硬式自主空中加油	45
2.4.3 美国海军自主高空加油计划	46
2.4.4 史上首次无人机自主加油对接	47
2.5 空中加油的基本过程	47
第三章 空中加油机及其系统组成	50
3.1 世界各国主要空中加油机	50

3.1.1	美国	50
3.1.2	俄罗斯	54
3.1.3	英国	56
3.1.4	欧洲空中客车公司	57
3.1.5	其他国家	58
3.1.6	空中加油机应该造多大	60
3.2	典型空中加油机的系统组成	61
3.2.1	伊尔-78 系列空中加油机	61
3.2.2	KC-135 空中加油机	62
3.2.3	KC-10 空中加油机	68
3.2.4	新型空中加油机的发展趋势	75
3.3	软管锥套式空中加油系统	79
3.3.1	软式加油吊舱	79
3.3.2	机身软式加油平台	83
3.3.3	受油插头与变阻力锥套	87
第四章	常见空中加油事故分析	90
4.1	加、受油机近距气动耦合	90
4.1.1	加油机尾流影响	90
4.1.2	受油机头波影响	91
4.2	人为原因或飞控系统缺陷	92
4.2.1	飞行员紧张心理	92
4.2.2	飞行员操纵技术欠缺	92
4.2.3	受油机飞控系统的设计缺陷	93
4.3	加受油设备安全性缺陷	94
4.3.1	燃油喷溅	94
4.3.2	软管甩鞭现象	95
4.3.3	软管意外脱落	96

第二篇 空中加油流场环境

第五章	空中加油流场分析	98
5.1	大气扰动	98
5.1.1	紊流	98
5.1.2	阵风	100
5.1.3	大气扰动对受油机的影响	101
5.2	空中加油机尾流概述	102
5.2.1	空中加油机尾流的组成	102
5.2.2	尾流研究方法	104

5.3	受油机机头波概述	107
第六章	加油机尾流数学模型	109
6.1	发展之初的尾流速度模型	109
6.1.1	附着涡系产生的诱导速度	109
6.1.2	尾涡系产生的诱导速度	110
6.1.3	马蹄涡模型的尾流速度	111
6.2	尾涡对形成后的尾流速度模型	112
6.3	加油过程中的尾流速度模型	113
6.3.1	受油机飞行区域	113
6.3.2	中间区域的尾流速度模型	114
6.4	尾流对受油机的等效气动作用	118
6.4.1	受油机上的尾流速度分布	118
6.4.2	尾流等效气动效应计算	120
6.4.3	等效气动效应法原理证明	123
6.4.4	等效气动效应法有效性验证	124
第七章	加油机尾流 CFD 模拟	127
7.1	计算流体力学基础	127
7.1.1	纳维-斯托克斯(N-S)方程组	128
7.1.2	流体与流动的基本特性	128
7.1.3	湍流模拟方法	129
7.2	KC-135 加油机三维模型建立	132
7.2.1	三维建模方法分析	132
7.2.2	KC-135 各部件的建模与组装	134
7.3	加油机尾流数值模拟方法研究	136
7.3.1	尾流数值模拟预处理	136
7.3.2	不同 CFD 方案模拟结果对比分析	140
7.3.3	方法精确性验证	145
7.4	加油机整机尾流场数值模拟及验证	148
7.4.1	整机尾流场数值模拟	148
7.4.2	尾流场精确性验证	149
7.5	加油机整机尾流特性分析	150
7.5.1	尾流场几何特性	150
7.5.2	尾流场速度特性	153
7.6	基于尾流数值模拟的受油机气动影响建模	159
7.7	受油机机头波效应 CFD 模拟	162
7.7.1	受油机三维模型建立	162
7.7.2	数值计算及方法验证	163

7.7.3 受油机头波流场特性分析	164
-------------------------	-----

第三篇 空中加油系统动力学模型

第八章 变质量飞行器动力学模型	169
8.1 数学预备知识	169
8.1.1 矢量点乘与叉乘	169
8.1.2 坐标旋转变换	171
8.1.3 矢量微分	172
8.2 受油机动力学建模	173
8.2.1 常用坐标系	173
8.2.2 外力和外力矩	174
8.2.3 变质量运动方程	180
8.2.4 运动方程的线性化	190
8.3 数值仿真	195
8.3.1 LQR 航迹控制器设计	195
8.3.2 仿真分析	196
第九章 软式加油设备动力学建模与控制	202
9.1 软管锥套组合体动力学建模	202
9.1.1 建模假设与坐标定义	202
9.1.2 运动学分析	203
9.1.3 动力学分析	204
9.1.4 外力分析	205
9.2 软管卷盘响应控制原理	207
9.2.1 恒力弹簧响应控制原理与缺陷分析	207
9.2.2 电机驱动与控制目标转换	208
9.3 基于指令滤波反推—滑模的甩鞭抑制方法	209
9.3.1 PMSM 指令滤波反推—滑模转角控制律设计	209
9.3.2 工作域的稳定性证明	212
9.4 数值仿真	213
9.4.1 静态特性仿真	213
9.4.2 头波影响下的锥套运动规律	218
9.4.3 软管甩鞭现象	222
9.4.4 PMSM 指令滤波反推—滑模甩鞭现象抑制	228
第十章 硬式加油设备动力学建模与控制	232
10.1 伸缩套管建模	232
10.1.1 扰动分析	233
10.1.2 大气扰动下的数学模型	233

10.2	伸缩套管 H_{∞} 控制律	241
10.2.1	控制律设计原理	241
10.2.2	不确定性建模	241
10.2.3	H_{∞} 俯仰控制律	242
10.2.4	H_{∞} 滚转控制律	243
10.3	数值仿真	244
10.3.1	鲁棒稳定性分析	244
10.3.2	鲁棒性能分析	245
 第四篇 人工空中加油飞行控制 		
第十一章	气动特性分析与控制结构规划	248
11.1	气动特性分析	249
11.1.1	纵向气动特性	249
11.1.2	侧向气动特性	251
11.1.3	惯性交感现象	253
11.2	控制律结构总体规划	255
11.2.1	控制律功能结构总体设计	255
11.2.2	基于动压的增益调度策略	256
第十二章	纵向通道控制律设计	258
12.1	纵向控制增稳指令构型	258
12.2	纵向指令支路设计	258
12.2.1	杆力杆位移特性设计	258
12.2.2	指令梯度设计	259
12.2.3	指令限制器设计	259
12.2.4	指令响应模型与人工配平设计	259
12.3	纵向反馈支路和前向支路设计	260
12.3.1	控制增稳控制律设计	260
12.3.2	迎角/过载限制器设计	261
12.4	纵向飞行品质评价	264
12.4.1	纵向飞行品质要求	264
12.4.2	仿真分析	265
12.4.3	控制参数增益调度曲线设计	268
第十三章	侧向通道控制律设计	269
13.1	侧向控制增稳控制律构型	269
13.2	侧向指令支路设计	269
13.2.1	滚转通道指令支路设计	269
13.2.2	航向通道指令支路设计	271

13.3	侧向反馈支路和前向支路设计	272
13.3.1	滚转通道反馈支路和前向支路设计	272
13.3.2	航向通道反馈支路和前向支路设计	273
13.3.3	滚转、偏航交联解耦	273
13.4	侧向飞行品质评价	274
13.4.1	侧向飞行品质要求	274
13.4.2	仿真分析	275
第十四章	控制律验证与加油模态改进	279
14.1	控制增稳模态验证与改进	279
14.1.1	使用、可用包线内控制律验证	279
14.1.2	失速/过失速控制律验证与改进	281
14.1.3	基于 FlightGear 的仿真试飞试验	287
14.2	空中加油模态控制律设计	291
14.2.1	“比例”式和“比例 + 积分”式控制思路的区别	291
14.2.2	纵向空中加油模态控制律设计	293
14.2.3	侧向空中加油模态控制律设计	297

第五篇 自主空中加油飞行控制

第十五章	自组织近似指令滤波反推控制	300
15.1	高阶单输入、单输出系统	301
15.1.1	预备知识	301
15.1.2	问题描述	301
15.1.3	局部权重学习算法	302
15.1.4	在线自组织近似指令滤波控制	304
15.1.5	稳定性证明	307
15.1.6	应用仿真算例	313
15.2	高阶多输入、多输出系统	317
15.2.1	预备知识	317
15.2.2	问题描述	317
15.2.3	局部权重学习算法	318
15.2.4	在线自组织近似指令滤波控制	320
15.2.5	稳定性证明	324
15.2.6	应用仿真算例	330
第十六章	自主对接飞行控制系统设计	336
16.1	基于有限状态机的航迹指令生成器	336
16.1.1	控制过程描述	336
16.1.2	相对航迹控制目标转换	337

16.1.3	近距对接参考轨迹设计	339
16.1.4	航迹指令生成器的程序实现	340
16.2	基于自组织近似指令滤波反推的航迹跟踪	340
16.2.1	受油机模型变换	340
16.2.2	函数近似器定义	342
16.2.3	控制律设计	343
16.2.4	稳定性证明	346
16.2.5	控制系统结构图	352
16.3	综合仿真分析	352
16.3.1	不考虑紊流和头波的情况	354
16.3.2	考虑紊流和头波的情况	361
16.3.3	在线自组织近似域大小的影响	370
参考文献		372
致谢		378

第一篇 空中加油简介

2014年9月23日,一条爆炸性新闻几乎占据了世界各大媒体的头版头条:“美国空军的F-22战斗机从阿联酋阿哈佛拉(Al Dhafra)空军基地起飞,借助从卡塔尔乌代德空军基地起飞的KC-135加油机在途中进行空中加油完成了对叙利亚伊斯兰国(ISIS)极端武装组织的远程空袭任务。”这次新闻事件中,与世界最先进的战斗机F-22首次参战同样吸引眼球的无疑是美国空军屡试屡爽的“空中加油”。究竟空中加油是“何方神圣”,它到底身怀哪些绝技,致使美国人在历次现代空袭任务中频频出手,连大名鼎鼎的F-22都要空中加油的鼎力相助才能顺利完成任务?本篇将带您一起深入认识空中加油技术。

第一章 空中加油技术的意义与发展

1.1 战略意义

空中加油力量是现代化空军有效扩展空中力量作战范围和作战能力的重要手段,已经成为世界主要军事强国空中力量的“标准配置”。空中加油技术简单地说,就是在空中一架航空器给另一架或数架航空器加注燃油,使其航程加大,续航时间增长的技术。

1.1.1 遗憾错过第二次世界大战

对于空中加油技术巨大战略作用的认识,其实经历了一段漫长而曲折的过程。

早在第一架飞机问世之初,就有人提出空中加油的设想,并且获得不少人的认同。第一次空中加油出现在20世纪20年代末,美国人利用两架双翼机完成了空中加油。在此后一段时间里,追求空中加油的次数和留空时间纪录成了航空冒险家们的嗜好。然而,自第一次空中加油出现之后20多年的漫长时间里,这项“新技术”竟由于乏人问津而“束之高阁”。空中加油在技术上没有太大困难,但在第二次世界大战血与火的空中大战中竟然没有出现它的身影。

起初,航空界始终认为空中加油技术并非亟待发展的关键航空技术,主要是基于两种观点。一是“螺旋桨飞机的螺旋桨在机体的前面,高速旋转的螺旋桨会打断加油管或使加油管缠绕而发生事故,因此不适合进行空中加油。第二次世界大战后喷气机成为主流,去除了螺旋桨的困扰,空中加油才风行起来”。二是“螺旋桨飞机使用的是活塞发动机,耗油率非常低,因此在第二次世界大战中对空中加油技术的需要不是很强烈。只是到了

喷气机大量使用后,对空中加油的需求增加,才导致加油技术得到发展”。后来,随着空中加油技术慢慢付诸实践,航空界才逐渐意识到这两种观点的错误。第一种说法现在看来相当可笑,第二次世界大战后双发、甚至四发螺旋桨飞机照样进行空中加油,到目前为止还未出现因螺旋桨与加油管碰撞而发生的事故;美军直升机的旋翼要比单发螺旋桨战斗机大得多,照样进行空中加油。第二种说法表面上看起来非常有道理,实际上也未能指明空中加油被忽视的真正原因。其实,活塞式发动机省油和喷气发动机费油对航程的影响是半斤对八两。省油意味着加进少量的油也能有可观的航程。为提高航程,第二次世界大战中的作战飞机普遍采用了机翼油箱设计并挂载了副油箱,这充分说明第二次世界大战中的螺旋桨飞机也同样需要空中加油。

整个第二次世界大战进程已经鲜明地表现出对空中加油技术的渴望。

为提高航程,人们首先想到的就是尽量增加机翼的翼展,但这样做会使机身结构重量增加,机动性下降,也会使战斗机的过载能力下降,速度受到限制。德国的 BF-109 战斗机是第二次世界大战中性能比较出色的战斗机,为了突出高速度和机动性,限制了翼展和翼面积,使航程大受影响,极大地影响了这种飞机的作战效能。德军飞行员在许多情况下都是还没有打完子弹就得返航。

美国、苏联等国都在第二次世界大战前进行了子母飞机的研制,其最主要的目的也是为了增加飞机的航程。另外,当时的活塞发动机功率/重量比很低,为提高这个比值,有人设想为飞机安装上二冲程发动机,能减少发动机重量一百多千克,这对于当时起飞重量只有 2t 的战斗机而言非常有吸引力。但这种发动机燃料消耗量要比四冲程高,这一想法最后无疾而终。

太平洋战争中的海空战斗充分说明了舰载机的航程对战局的重要影响。为了增加“零”式战斗机的航程,日本飞行员“发明”了以极低速度飞行、让发动机保持在极低功率状态下的方法,使战斗机的航程几乎增大了 1/3。但这样大幅度增加了飞行时间,在飞抵目标开始攻击时,飞行员已经被六个多小时的远程飞行搞得精疲力竭,而且,飞行时间长也为美国的雷达提供了充分的预警时间。如果有空中加油,就没有必要浪费宝贵的时间,也就意味着提高了攻击的突然性。为了节省燃料并增加航程,美国海军在起飞侦察机时都尽量使用航空母舰上的弹射器,大型水上侦察机只要有条件,也是尽量使用弹射器,要不然就采用火箭助推,美国海军在第二次世界大战期间光是为了水上飞机起飞节省燃料就研制了三型液压弹射器。当时的螺旋桨飞机如果能进行空中加油,则侦察范围会成倍扩大,巡航时间会大增,1 架就有可能相当于 3 架或更多的架次。

从 1942 年开始,美国和英国开始利用大型轰炸机对德国进行战略轰炸,但由于护航战斗机航程有限,往往在越过海峡进入法国上空后战斗机就要返航。轰炸机群通常是在没有战斗机护航的情况下展开行动的,致使损失惨重。为减少伤亡,英国空军全线转入夜间攻击,这虽然容易避开德国战机拦截,但自身投弹精度也大受影响。1943 年底,美国空军为了实施远程轰炸,让 B-29 从印度的加尔各答起飞,受航程限制必须转场到中国成都机场加油挂弹。如果当时有空中加油,美、英两国轰炸机将会得到战斗机全程护航,行动突然性、隐蔽性将大大增强。

第二次世界大战中交战各国共生产了大约 100 万架作战飞机,由于航程受限,大量飞机进行攻击或空战前只能大量“堆积”在前线机场,导致几乎所有的前线机场在战斗或战

役紧张时总是处于严重拥挤状态。如果当时有空中加油,各作战飞机将可直接从各自机场飞赴空战前线,大大降低前线机场压力。

可以说,第二次世界大战中的飞行员和飞机设计师都遇到了飞机航程受限制的困扰,有相当大数量的作战飞机都是因为燃料消耗完而坠毁的,如果有空中加油技术,这些缺陷就可以得到相当大的弥补,第二次世界大战的空战史就有可能重写。

现代成熟的空中加油技术虽然与早期人工操作方式有很大不同,但其设备和操作过程仍属于一种航空边缘技术,和飞机本身的高技术相比,在结构上是非常简单的,使用起来也并不复杂。从实用的角度看,1946年以后空中加油技术就已基本成熟,现有的软管锥套式加油系统和硬管式加油系统与第二次世界大战后几年间研制的加油装置并没有太大差别,可以说基本上没有改变。这也说明加油技术的简单和容易实现。通过第二次世界大战中大量空中作战行动受到飞机航程限制的战例,我们一定会为空中加油技术没有在第二次世界大战时开发出来而惋惜。可以说,第二次世界大战中作战飞机对加油技术的需求是非常强烈的,但最需要空中加油技术的时候它却被忽视了,这无疑值得我们后人深思!

1.1.2 现代空战显神威

实事求是地讲,空中加油技术的战略作用在其发展早期是被海空军决策者一度忽视的。现代局部战争的出现才使得空中加油技术得到广泛使用。

1. 越南战争初露锋芒

美国空军在战争中大规模使用空中加油始于越南战争。1964年6月9日,4架KC-135加油机首次参加实战,为美国空军的8架F-100战斗机实施了空中加油。从战争爆发到停战的9年零2个月时间内,美军172架KC-135加油机共飞行194687架次,进行空中加油813878次,共加燃油410万t。此后,美军发动的历次战争几乎都有加油机的身影。

2. 马岛战争大显神威

1982年,英国和阿根廷爆发马岛战争。英国为鼓舞士气,夺回失地,决定迅速发起“黑鹿行动”——派遣“火神”轰炸机从英国本土的朴茨茅斯怀丁顿基地远程奔袭马岛(马尔维纳斯群岛)轰炸斯坦利港机场。

从英国怀丁顿基地到马岛,距离远的令人咋舌:先要从怀丁顿基地飞6600km到位于南大西洋的中转站英属阿森松岛,再从那里飞6200km到马岛。因此,英国计划使用11架“胜利者”加油机为2架“火神”实施空中加油。1982年4月30日深夜22点50分,行动开始。经过16小时零2分钟,英军完成了世界空战史上最长距离的一次空中奔袭。“黑鹿行动”中英军“火神”轰炸机和“胜利者”加油机组成的机群所飞行的航路如图1-1所示。

从英国起飞,飞到中间6000多千米的时候就得加油。一架“胜利者”就要给“火神”加油。那么别的加油机还要再给这架“胜利者”加油。把油全部加给“胜利者”的那架加油机就只能返航了。飞行到一定距离,这种“胜利者”给“胜利者”,“胜利者”给“火神”的接力式的加油过程就要反复进行。所以“黑鹿行动”中虽然只有2架“火神”实施轰炸,但却需要11架“胜利者”进行加油补给。“黑鹿行动”中空中加油任务模式如图1-2所示。尽管现代空战的样式天翻地覆,但还是应验了那句老话:兵马未动粮草先行。

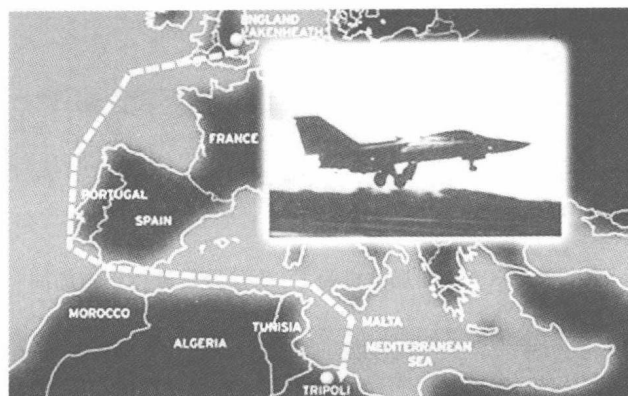


图 1-3 “黄金峡谷”行动中 F-111 的曲折航线

4. 海湾战争的幕后主角

海湾战争中,美国空军出动了其全部的 KC-10 加油机,为执行战斗攻击任务架次总数的约 60% 的飞机进行空中加油。KC-10 也是“沙漠风暴”行动首批出动的飞机之一,平均一天就要对 1433 架次的飞机进行空中加油。

把战机及其支持设备和人员、地面作战部队、装备和补给运到中东需要在短时间内进行非凡的空中加油努力。第一批 F-15 需要直接从弗吉尼亚州兰利空军基地飞到沙特阿拉伯,整个过程耗时 15h,要进行 7 次空中加油。空中加油在战争中发挥了关键作用。如果没有空中加油,F-117A 隐身战斗机在投放炸弹前就会耗尽燃料。在战争中,许多飞机来到加油点时几乎用光了燃油。美国空军预备役第 336 空中加油中队的罗恩·麦肯齐少校说:“在‘沙漠风暴’行动中经常能听到飞行员大呼小叫地需要燃油。”海湾战争期间 F-14 机群在 KC-10 加油机后争相排队加油的情景如图 1-4 所示。



图 1-4 海湾战争期间嗷嗷待哺的 F-14 在一架 KC-10 后排队加油

战斗机飞行员们并不是在战争中唯一依赖空中加油机的人。大型指挥和控制飞机(如 E-3 预警机和 E-8 战场联合监视机)也依赖于这些飞行加油站持续留空,来完成持续的任务控制和侦察任务,如图 1-5 所示。

而货机,如巨型的 C-5“银河”则要通过空中加油来加速货物的交付并增加载货量。轰炸机,像古老的 B-52 通过加油就能挂载更多的炸弹从遥远基地飞到战区。

海湾战争中,为增强隐蔽性,美军许多突袭任务都需要夜间发起,如图 1-6 所示。强大的夜间空中加油能力极大地拓展了美国空军的全时空作战能力。

在海湾战争中,空中加油为多国部队赢得战争的胜利立下了汗马功劳。据统计,战争期